

Installation de coulée continue pour une mise en rotation électromagnétique du métal liquide en transit dans la busette de coulée.

La présente invention a trait à la coulée continue des métaux, de l'acier en particulier, mettant en œuvre une busette de coulée immergée qui plonge dans une lingotière placée en dessous. Plus précisément, l'invention concerne la mise en rotation axiale du métal liquide en transit au sein d'une telle busette entre le répartiteur de coulée et la lingotière.

On sait que la mise en rotation axiale du métal déjà au sein de la busette de coulée est un moyen reconnu de contrôle des écoulements dans la lingotière en modifiant la répartition des bulles de gaz et inclusions présentes dans le métal liquide avant son arrivée en lingotière. On parvient ainsi à:

- réduire, voire éliminer, les dépôts d'inclusions le long de la paroi intérieure de la busette ainsi que, en cas de busette à ouïes de sortie latérales pour la coulée de brames, au niveau de ses ouïes et de sa cuvette de fond;
- réduire fortement la profondeur de pénétration des bulles de gaz et inclusions dans le puits liquide du produit en cours de coulée, donc également le risque de leur piégeage sur la face intrados des produits coulés sur machine courbe
- réduire la vitesse de circulation du métal liquide sous le ménisque ainsi que les fluctuations de niveau de celui-ci;
- limiter les instabilités d'écoulement, de type balancements de jets, dans la lingotière en générant un effet "gyroscopique" sur les écoulements dans la busette.

La mise en rotation des écoulements dans la busette de coulée apparaît ainsi comme un moyen efficace pour lutter contre l'apparition des défauts d'aspect de surface, de type boursouflures et exfoliations, sur les tôles laminées à froid des nuances d'acier pour application automobile et des aciers pour emballage. Cette technique permet donc la réduction des opérations d'écricquage sur les brames coulées en continu (réduction voire suppression des défauts de surface sur tôles de type exfoliation), la suppression des déclassements et des litiges pour défauts boursouflés, ainsi que l'augmentation de productivité des machines par l'allongement des séquences et l'augmentation des vitesses de coulée.

La mise en rotation du métal liquide dans la busette de coulée a déjà été proposée en utilisant différents types d'actionneurs. On peut schématiquement distinguer deux types d'actionneurs: les actionneurs "passifs" et les "actifs".

Les actionneurs "passifs" sont entre autres les modifications de design de la paroi interne de la busette (par exemple: spirales), les organes tels que hélice, busette interne hélicoïdale, etc... qui sont implantés dans le corps même de la busette, ou les modifications de la partie supérieure de la busette à la jonction avec le répartiteur (par exemple: cône d'accélération) ou encore les modifications de l'organe même de régulation du débit métal dans la busette. Les inconvénients majeurs de ce type

d'actionneurs sont de générer une vitesse de rotation directement dépendante du débit métal transitant dans la busette et de constituer des sites privilégiés de dépôts d'inclusions dans la busette, d'où une augmentation potentielle des risques de bouchage.

Les actionneurs "actifs" sont essentiellement de nature électromagnétique: un inducteur électromagnétique annulaire statique de type polyphasé entoure la busette à faible distance sur une partie de sa longueur et génère un champ magnétique tournant autour de l'axe de coulée destiné à entraîner en rotation axiale avec lui le métal liquide présent dans la busette. On trouvera au besoin des exemples décrits dans les documents JP 06 023498 ou JP 07 108355 ou encore JP 07 148561.

Cependant, les dispositifs électromagnétiques jusqu'ici proposés sont, pour la plupart, basés sur la technologie des stators linéaires à champ tournant tangentiel fonctionnant à basse, voire à très basse fréquence (<10 Hz). Ces dispositifs présentent notamment les inconvénients de:

- générer des vitesses de rotation souvent trop faibles, compte tenu des fréquences de courant utilisées, pour obtenir les effets souhaités (par exemple, à 4 Hz triphasé utilisable pour un diamètre interne de busette de 80 mm, la vitesse de rotation théorique maximale est de 80 t/min),
- générer dans le métal liquide un champ de force fortement concentré près de la paroi intérieure de la busette, ce qui a pour conséquence de créer une zone de forte dépression dans la partie centrale de la busette où le métal est alors accéléré dans la direction verticale descendante;
- devoir fonctionner avec des courants électriques de forte intensité ($>300-500$ A), ce qui conduit à des dispositifs de taille importante afin de pouvoir assurer leur refroidissement, donc peu aisés à mettre en œuvre sur une machine de coulée continue et de plus nécessiter l'utilisation de générateur électrique très onéreux.

Les autres sont à champ magnétique traversant, donc à pôles saillants bobinés à une paire de pôles par phases en regard l'un de l'autre de part et d'autre de l'axe de la busette. L'invention s'inscrit dans cette catégorie. Ils permettent de s'affranchir de certains des inconvénients prémentionnés, en particulier du phénomène de dépression centrale. Toutefois, l'exiguïté de l'endroit alliée à une puissance électrique installée nécessairement élevée, ainsi que la diminution recherchée de l'entrefer par rapprochement entre la dent polaire saillante vers l'intérieur dépassant l'enroulement et la busette pour maximiser le couplage électromagnétique, conduisent inévitablement en fait à une détérioration du rendement énergétique en même temps qu'à un certain degré de désorganisation possible des mouvements de rotation du métal suite, notamment, à des risques de pontages parasites du flux magnétique entre pôles trop voisins appartenant à des phases différentes de l'alimentation électrique.

Le but de la présente invention est de proposer une solution à une mise en rotation électromagnétique du métal liquide au sein d'une busette de coulée qui ne présente pas les inconvénients des solutions connues.

A cet effet, l'invention a pour objet une installation de coulée continue des métaux, de l'acier en particulier, dans laquelle la busette immergée par laquelle le métal en fusion à couler arrive en lingotière depuis un répartiteur de coulée situé au-dessus est entourée par un inducteur électromagnétique annulaire statique à champ magnétique mobile tournant autour de l'axe de coulée destiné à entraîner en rotation axiale avec lui le métal en fusion, ledit inducteur étant de type polyphasé à champ magnétique traversant pourvu d'une paire de pôles par phase et dont chaque pôle est formé par un enroulement électrique bobiné autour d'une dent polaire saillante vers l'intérieur se terminant par une face polaire disposée en regard et à proximité de la busette, les dents polaires étant reliées entre elles par une culasse magnétique périphérique extérieure de fermeture du flux magnétique, installation caractérisée en ce que chaque dent polaire présente un rétrécissement latéral (un biseau par exemple) à l'extrémité de sa partie saillante, qui augmente la distance séparant les faces polaires entre elles.

Selon une variante avantageuse, l'inducteur annulaire est formé en deux demi-coquilles articulées pivotantes pouvant se refermer autour de la busette.

Comme on l'aura sans doute compris, l'invention met en œuvre un champ magnétique dit "traversant", c'est à dire passant par l'axe de la busette sans affaiblissement notoire de son intensité entre le bord et le centre de celle-ci.

Grâce à la base technologique retenue, à savoir celle à une paire de pôles par phase de l'alimentation électrique alimentant un inducteur annulaire polyphasé à pôles saillants bobinés répartis autour de la busette, le champ magnétique tournant produit est du type "traversant" recherché. Autrement-dit, à chaque instant, l'axe de coulée est au centre de l'entrefer de l'inducteur et le champ produit prospère dans cet entrefer en passant par l'axe de coulée pour, depuis un pôle magnétique donné, rejoindre le pôle magnétique apparié de signe contraire situé en face et non à côté de lui comme ce serait le cas avec un inducteur à pôles répartis ou à plusieurs paires de pôles par phase.

On rappelle que ce type de technologie n'est pas nouveau en soi. Il est même assez largement utilisé pour la mise en rotation du métal liquide coulé, non pas au sein d'une busette, mais dans la lingotière elle-même, donc dans le cas d'induits à faire tourner (la colonne de métal liquide) de bien plus grand diamètre apparent que celui du jet de métal dans la busette et avec une exigence de vitesse angulaire de rotation corrélativement bien moindre (voir par exemple USP 4 462 458). Or, contrairement aux idées reçues, il s'avère que le transfert de cette technologie depuis la lingotière à la busette de coulée peut, sans nécessairement consentir à une baisse de puissance installée marquée, s'accompagner d'une réduction de taille de l'inducteur compatible avec le montage de dernier autour et au plus près d'une busette de coulée pourvu que l'on conserve le caractère "traversant", en tous cas essentiellement "traversant", du champ magnétique produit, et ce sans nuire alors à son nécessaire refroidissement.

Or, c'est précisément là que se trouve l'idée à la base de l'invention: parvenir, sans pénaliser les performances de l'inducteur, préserver ce caractère "traversant" du

champ malgré la compacité de l'inducteur et la minimisation de l'entrefer en consentant à une légère perte de masse magnétique localisée à des endroits choisis des pôles saillants, à savoir les bords des faces actives, pour contre-carrer la tendance naturelle du champ magnétique de se propager dans l'entrefer selon les chemins les moins reluctants en bouclant entre des pôles voisins proches les uns des autres.

Des tests réalisés sur acier ont confirmé la capacité d'un tel inducteur à mettre en rotation le métal s'écoulant dans une busette immergée dans des conditions de coulée bien plus sévères que celles qui seront rencontrées dans les machines industrielles de blooms ou de brames. Ces tests ont été effectués en effet avec une busette de type droite (ouïe axiale unique s'ouvrant dans le fond) dans laquelle le métal s'écoulait à une vitesse moyenne de l'ordre de 3.5 à 4.2 m/s, sachant que dans une busette de coulée de brames, les vitesses moyennes débitant sont plutôt comprises entre 1,5 et 2,0 m/s.

L'invention sera de toute façon bien comprise et d'autres aspects et avantages apparaîtront au vu de la description qui suit donnée à titre d'exemple de réalisation et en référence aux planches de dessins annexées sur lesquelles:

- la figure 1 est un schéma représentant, vu en section droite, l'inducteur en deux demi-coquilles aboutées pourvu de son écran thermique interne bordant l'entrefer;
- la figure 2 est un schéma analogue au précédent mais destiné à bien montrer la propagation des lignes de force du champ magnétique traversant dans l'entrefer telles que figées à un instant donné quelconque du fonctionnement de l'inducteur;
- la figure 3 est un schéma fonctionnel de principe montrant l'articulation des deux demi-coquilles constitutives de l'inducteur;
- la figure 4 montre la carte des vitesses du métal liquide tournant au sein de la busette de coulée sous l'effet du champ magnétique dans un plan de section droite de la busette;
- la figure 5 montre l'évolution de l'intensité B du champ magnétique dans l'entrefer le long un diamètre D de la busette pris dans un plan situé à mi hauteur de l'inducteur;
- la figure 6 montre, en correspondance avec la représentation de la figure 5, l'évolution corrélatrice du champ de forces magnétiques F_B le long d'un diamètre D de la busette selon un profil radial R et selon un profil orthoradial OR .

Sur les figures, les mêmes éléments sont désignés par des références identiques.

Comme on le voit en se reportant aux figures 1 à 3 conjointement, l'inducteur 1 est un stator de moteur linéaire refermé sur lui-même, constitué à cet effet de deux parties hémi-tubulaires égales indépendantes 2a et 2b, (les demi-coquilles). Chaque demi-coquille comporte trois pôles saillants bobinés 3 dont la face polaire 4 est tournée vers l'intérieur, ces pôles magnétiques, en tôles de fer doux empilées assemblées, étant classiquement reliés entre eux par une culasse hémi-tubulaire périphérique externe 5a, 5b. L'ensemble est dimensionné pour que les deux culasses appariées viennent s'abouter

dans le plan de jonction J lorsque l'inducteur est en position de travail fermée montrée sur les figures 1 et 2.

Une calotte 7a, 7b, également de forme héli-tubulaire correspondante coiffe intérieurement les faces polaires de chaque demi-coquille et forme, une fois l'inducteur en position fermée, un écran de protection thermique 7 qui entoure à faible distance la busette de coulée. Cette protection thermique est souhaitable pour les enroulements électriques 3 de l'inducteur à l'égard du rayonnement émis par la busette de coulée 8 montrée sur la figure 3 et canalisant le flux de métal en fusion vers la lingotière. Des précisions sur la constitution possible de cet écran seront données par la suite.

L'enroulement électrique 6 de chaque pôle bobiné 3 est relié à une phase d'une alimentation électrique triphasée (non représentée) destinée à fournir le courant primaire de l'inducteur. L'inducteur étant en position fermée, un pôle saillant quelconque de l'une des demi-coquilles 2a fait diamétralement face à un pôle saillant de l'autre demi-coquille 2b. Ces deux pôles forment une "paire de pôles" en ce sens qu'ils sont tous deux connectés à la même phase de l'alimentation électrique, mais en opposition (par exemple via un sens de bobinage différent) de manière à ce que, à chaque instant, leurs faces actives soient de signes contraires. Cette condition est nécessaire pour que le champ magnétique produit soit de type traversant.

Les pôles 3 et la culasse 5a,5b de retour du flux magnétique sont feuilletés en tôles Fe-Si à grains orientés d'épaisseur initiale 0.3 mm de manière à minimiser les pertes d'hystérésis. Leur hauteur opérationnelle (hauteur de la face active 4) est comprise entre 50 (valeur minimale) et 500 mm, fonction de la place disponible entre le répartiteur et le haut de la lingotière entre lesquels l'inducteur prendra place. Leur diamètre interne (diamètre de l'entrefer) est de l'ordre du diamètre externe de la busette de coulée augmenté d'une dizaine de mm à peine pour préserver une séparation mais de manière à assurer le meilleur couplage inductif possible.

Les enroulements primaires 6 sont constitués d'un grand nombre (plusieurs centaines) de spires en fils de cuivre de très faible diamètre supportant des densités de courants élevées ($>10 \text{ A/mm}^2$). Ils sont munis en leur sein d'extracteurs de chaleur en cuivre refroidis par circulation d'eau (non représentés).

Ces bobinages sont alimentés en courants triphasés à moyenne fréquence allant de 50 Hz à 600 Hz. Dans la technologie proposée, on notera que fonctionner à fréquence élevée, supérieure à 50 ou 60 Hz, permet, à intensité constante des courants, d'augmenter le couple moteur que les forces électromagnétiques exercent sur le métal s'écoulant dans la busette. Toutefois, cette option nécessite l'utilisation de convertisseur de fréquences contrairement au fonctionnement à la fréquence du réseau (50 ou 60 Hz).

Comme le montre le diagramme de la figure 5, ce moteur statique que constitue l'inducteur 1 peut générer dans son entrefer occupé par la busette un champ électromagnétique transverse (dit traversant) de forte intensité (entre 1000 et 1500 gauss) pour des valeurs faibles des courants inducteurs (quelques dizaines d'ampères).

Ce champ, comme on le voit sur le diagramme, est quasiment uniforme dans la partie centrale de l'entrefer. Cette caractéristique essentielle de l'invention permet de générer dans le métal liquide un champ de forces uniformément décroissant de la paroi jusqu'au centre, comme montré sur le diagramme de la figure 6. Ceci permet, comme le
5 montre clairement également la carte de vitesse de la figure 4, de mettre en rotation le métal liquide avec une vitesse qui reste importante même dans la partie axiale de la busette. Cette spécificité est nécessaire pour éviter une trop forte dépression dans la partie centrale de la busette où le métal aurait tendance alors à "fuir" et à subir une forte accélération verticale descendante, annulant ainsi une partie de l'effet bénéfique de la
10 mise en rotation.

Comme il apparaît clairement sur la figure 2, c'est grâce à la forme retrécie des dents magnétiques radiaux 3 à leur extrémité libre 4 (les faces polaires) que, à tout moment, les lignes de force du champ magnétique dans l'entrefer relient pour l'essentiel deux pôles diamétralement opposés et que seule une partie résiduelle du champ boucle
15 entre pôles voisins. Ce résultat, indispensable à la mise en oeuvre de l'invention, est obtenu, en dépit de la compacité nécessaire de l'inducteur, grâce à cette forme retrécie de l'extrémité des pôles, qui fait que malgré leur rapprochement mutuel à mesure que l'on avance vers le centre, la distance qui sépare leurs extrémités libres deux à deux reste suffisante pour éviter un pontage important des lignes de champ entre elles. C'est
20 cela qui, dans le cas d'inducteur compact de petite taille, est garant de la forte intensité relative du champ magnétique dans l'axe (cf. fig. 5), autrement-dit du caractère impérativement "traversant" de ce champ sans lequel l'invention ne produit pas les effets recherchés. Comme on le voit sur la figure 1 et plus visiblement encore sur la figure 2, ce retrécissement de forme des dents radiales 3 est obtenue grâce à un
25 prédécoupage en biseau 12 des extrémités des tôles à empiler pour former les former. L'angle du biseau est à ajuster en fonction du diamètre externe de la busette à entourer. On retiendra toutefois que la face polaire 4 ne doit pas être, en surface, inférieure à la moitié de la section droite de la dent 3 et que le début du biseau de retrécissement 12 sur le corps de la dent peut s'initier qu'au deux tiers de la longueur. Il n'est pas nécessaire de
30 débiter avant et c'est même souhaitable de le faire le plus tard possible afin de maximiser la masse magnétique de l'nducteur.

En alimentant l'inducteur par un circuit résonant, l'intensité des courants primaires peut être fortement augmentée. La technique proposée permet en effet, dans une large gamme d'intensité des courants primaires, d'augmenter très fortement
35 l'intensité du champ électromagnétique dans l'entrefer, en augmentant l'intensité de ces courants à des valeurs bien au delà de l'intensité seuil correspondante à la saturation magnétique de la culasse 5. Celle-ci permet de canaliser les lignes de champ magnétique et d'augmenter, dans l'entrefer du moteur, l'intensité de ce champ magnétique jusqu'à ce que ce dernier atteigne sa valeur de saturation dans la culasse. Au
40 delà de cette valeur seuil, c'est le champ magnétique généré, par l'inducteur directement

dans l'air qui contribue à l'augmentation de l'intensité du champ dans l'entrefer du moteur.

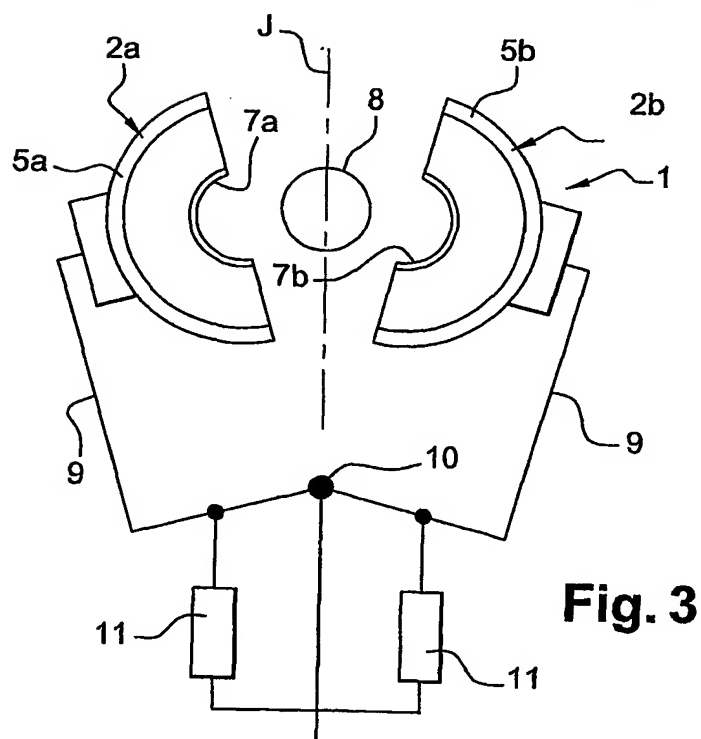
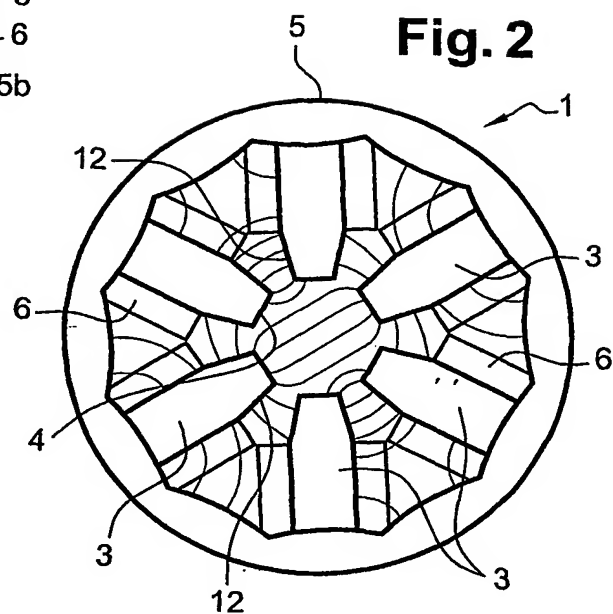
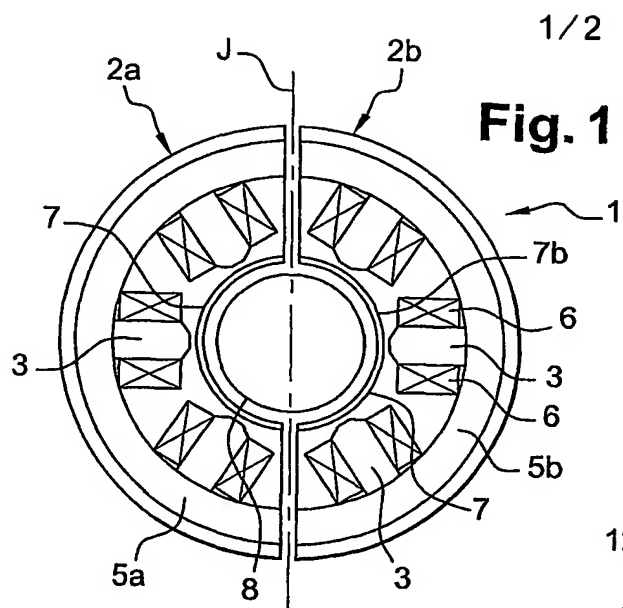
En fonctionnement, l'inducteur est très proche (à 5 mm environ de distance) de la busette de coulée 8 dont la température extérieure est de l'ordre de 1100 à 1200°C. Sa protection thermique, vis-à-vis du rayonnement émis par la busette, est alors assurée par l'écran segmenté en cuivre 7, de fine épaisseur, refroidi par circulation d'eau et transparent au champ électromagnétique grâce à cette segmentation.

La constitution de l'inducteur 1 en deux parties hémi-tubulaires indépendantes 5a et 5b permet aisément sa mise en place autour de la busette et son retrait à tout moment sans aucune modification du procédé standard de coulée. En se reportant à nouveau sur la figure 3, on voit que, pour être mis en place autour de la busette de coulée 8, l'inducteur est avantageusement maintenu par un support constitué de deux bras 9 articulés autour d'un axe pivotier 10. Les bras sont animés par des vérins 11 qui assurent leur fermeture-ouverture et permettent d'exercer une force de contact suffisante (supérieure à 200 kgf) entre les culasses 5a et 5b des deux parties hémi-tubulaires 2a et 2b une fois celles-ci aboutées comme le montre la figure 1. D'une part, un contact étroit entre les culasses 5a et 5b est nécessaire à un bon bouclage des lignes de champ magnétique entre les deux parties constitutives de l'inducteur et donc à un bon rendement électromagnétique. D'autre part, une force importante de fermeture de deux hémi-tubes est nécessaire pour empêcher les vibrations qui seraient inévitablement générées par les forces électromagnétiques oscillantes.

Il va de soi que l'invention ne saurait se limiter à l'exemple de réalisation décrit mais qu'elle s'étend à de multiples variantes et équivalents dans la mesure où est respectée sa définition donnée par les revendications jointes.

REVENDICATIONS

- 5 1) Installation de coulée continue des métaux, de l'acier en particulier, dans laquelle la busette immergée (8) par laquelle le métal en fusion à couler arrive en lingotière depuis un répartiteur situé au-dessus est entourée par un inducteur électromagnétique annulaire (1) à champ magnétique tournant autour de l'axe de coulée destiné à entraîner en rotation axiale avec lui le métal en fusion, ledit
- 10 inducteur (1) étant du type polyphasé à champ magnétique traversant pourvu d'une paire de pôles (3) par phase et dont chaque pôle (3) est formé par un enroulement électrique bobiné (6) autour d'une dent polaire (3) saillante vers l'intérieur se terminant par une face polaire (4) disposée en regard de la busette (8), les dents polaires étant reliées entre elles par une culasse magnétique périphérique extérieure
- 15 (5a, 5b) de fermeture du flux magnétique, installation caractérisée en ce que chaque dent polaire (3) présente, à l'extrémité de sa partie saillante, un rétrécissement latéral (12) qui augmente la distance séparant les faces polaires (4) entre elles.
- 20 2) Installation de coulée continue selon la revendication 1 caractérisée en ce que la busette immergée (8) est une busette à ouies de sortie latérales.
- 25 3) Installation de coulée continue selon la revendication 1 caractérisée en ce que l'inducteur (1) comporte à sa périphérie intérieure un écran de protection thermique (7) entourant la busette à distance.
- 4) Installation de coulée continue selon la revendication 1 caractérisée en ce que l'inducteur annulaire (1) est formé en deux demi-coquilles articulées pivotantes (2a, 2b).
- 30 5) Installation coulée continue selon la revendication 1 caractérisée en ce qu'elle comprend en outre un circuit électrique résonant dans lequel l'inducteur est monté en série avec une capacité réglable.
- 35 6) Installation de coulée continue selon la revendication 4, caractérisée en ce que l'inducteur (1) est monté à l'extrémité de bras-support (9) de maintien en position, ce bras support étant rétractable et pourvu de moyens commandés (11) actionnant chaque demi-coquille (2a, 2b) en pivotement.



2 / 2

Fig. 4

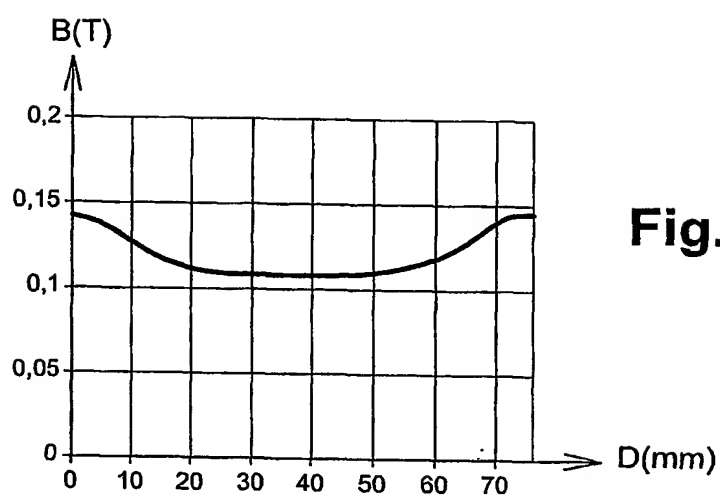
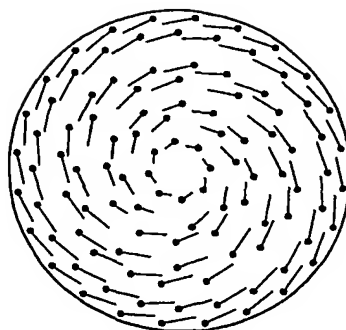


Fig. 5

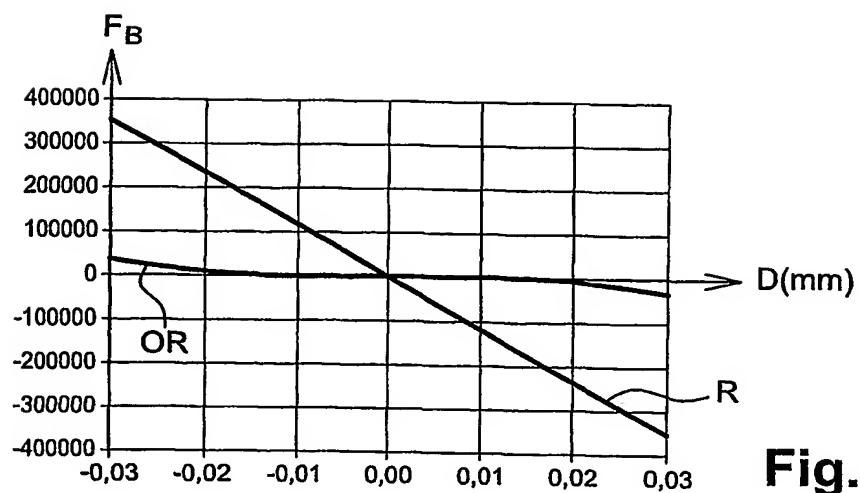


Fig. 6